



Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Desenvolvimento de uma carga útil para foguetes de treinamento do CLA
Bolsista: Mateus Furtado Holanda
Orientador: José Bezerra Pessoa Filho
Período a que se refere o relatório: Agosto de 2016 a Julho de 2017

Resumo

O presente projeto tem como objetivo conceber, desenvolver, construir, integrar e realizar a análise pós-voo em um ambiente de microgravidade de uma carga-paga embarcada nas seções de experimentos de foguetes lançados pelo Centro de Lançamento de Alcântara. Inicialmente o projeto seria testado em um voo do Foguete de Treinamento Básico (FTB). Contudo, devido à oportunidade de embarcá-lo em um voo do foguete VS-30, previsto para dezembro deste ano, optou-se por adaptá-lo para esse voo.

A função do experimento é coletar dados em voo e transmiti-los em tempo real para a estação de solo para posterior análise. Os parâmetros do voo a serem coletados são: aceleração linear, orientação e campo magnético nos 3 eixos, aceleração de vibração, temperatura, altitude e pressão dentro da seção de experimentos, que irão compor o 1º experimento. Adicionalmente serão coletadas imagens através de uma câmera, que comporá o 2º experimento.

Muito embora o experimento tenha sido adaptado ao voo do VS-30, o objetivo deste trabalho continua sendo o desenvolvimento de um sistema que permita a coleta e transmissão de dados de experimentos outros que possam ser embarcados nos Foguetes de Treinamento Básico (FTB). A continuidade desse trabalho será objeto de submissão de uma nova proposta de bolsa ao PIBIC/IAE.



1. Introdução

O VS-30 é um foguete mono-estágio que utiliza um único motor de propelente sólido (S30), capaz de atingir altitudes de até 150 km. O ambiente projetado para comportar sua carga-útil possui capacidade de levar até 260 kg. Seu próximo voo está previsto para dezembro de 2017 (Operação Mutiti). Além o experimento objeto deste trabalho de Iniciação Científica, o VS-30 levará ao espaço experimentos do IAE, IEAv, INPE e UEL. O projeto desenvolvido ao longo da bolsa de Iniciação Científica pretende permitir o voo de experimentos mais simples a bordo dos Foguetes de Treinamento Básico (FTB) que, em que pese, possuírem a capacidade de transportarem 5 kg de carga-útil a 30 km de altitude, quase sempre voam vazios pela ausência de um sistema capaz de obter e enviar, via telemetria, medidas realizadas por outros experimentos. Portanto, o experimento a ser embarcado no voo do VS-30 pretende se tornar um subsistema dos foguetes FTB.

O objetivo do experimento proposto no voo do VS-30 é monitorar o ambiente da seção de experimentos desse veículo, desde o lançamento (aceleração máxima de 13g) até o voo descendente. Com essas observações será possível correlacionar os dados obtidos pelos sensores com dados já obtidos em lançamentos passados. Vale frisar que o voo do VS-30 não propiciará ambiente de microgravidade e sua carga-útil também não será recuperada.

A coleta de imagens e vídeo dentro do foguete também pode ser útil na detecção de anomalias no funcionamento dos experimentos dentro do módulo de testes da carga-útil, verificando *'in loco'* os efeitos das vibrações causadas durante o voo propulsado dentro da atmosfera terrestre. Considerando-se que a maior parte dos componentes utilizados no experimento tem origem comercial, pretende-se com esse voo comprovar a confiabilidade deles quando submetido a situações extremas.

O principal resultado esperado do voo é a obtenção do perfil de acelerações e velocidades angulares da plataforma, essenciais ao cálculo da atitude do foguete. Outros resultados esperados são:

- A construção de uma eletrônica de aquisição de dados com melhor desempenho, como forma de aumentar a resolução e precisão nas medidas.
- Aquisição de vídeos da seção de experimentos do foguete por meio de uma câmera embarcada.

É importante ressaltar que o experimento proposto é do tipo “malha aberta”, uma vez que os dados obtidos pelos sensores serão monitorados pelo computador de bordo e enviados para o solo como “*raw data*,” para posterior processamento, análise, validação e disponibilização aos interessados. Uma vez validado em voo, pretende-se melhorar a forma com que o experimento trata os dados coletados, na forma de uma “malha fechada.”

2. Materiais e métodos

Como já mencionado, o experimento a ser embarcado no VS-30 será constituído de duas partes, doravante denominadas 1^o Experimento e 2^o Experimento, Tabela 1. Para a primeira parte será necessária um microcontrolador e sensores específicos para medir os parâmetros pretendidos dentro do ambiente da carga-paga do foguete VS-30. Ela é composta por 1 computador de bordo kit com microcontrolador STM32 e plataforma ARM[®] mbed[™]; 1 acelerômetro linear de 3 eixos ADXL377; 1 magnetômetro de 3 eixos HMC5883L; 1 giroscópio de 3 eixos L3GD20H; 1 acelerômetro para vibrações de 1 eixo ADXL001; 1 sensor de temperatura LM35; e 1 altímetro MS5607. Os acelerômetros possuem escala de $\pm 200g$ e $\pm 500g$, respectivamente para acelerações lineares e vibracionais do foguete. Estes sensores foram escolhidos especificamente para operar em ambientes de acelerações, vibrações e faixa de temperatura próprios de vôos suborbitais. A taxa de transmissão de dados será de 9.600 bits/s.

Além disso, o experimento possuirá um projeto de fonte própria, com conversores, divisores de potência e filtro de entrada. Dessa forma, busca-se construir uma eletrônica capaz de ser operacional e integrada a diferentes foguetes utilizados pelo CLA. O experimento será alimentado durante todas as etapas da missão, incluindo o pré-voo na rampa de lançamento, com a ajuda de um equipamento de suporte em solo (EGSE) através de um umbilical.

A segunda parte do experimento (câmara de vídeo) são: 1 Raspberry Pi 3 Modelo B com módulo para câmera e 1 Shield V3 RS485 para Raspberry Pi. Ou seja, basicamente um microprocessador com câmera integrada para a aquisição de imagens e vídeos do voo. A taxa de transmissão de dados para a telemetria deste experimento é de 57.600 bits/s. O experimento também foi desenvolvido de modo a suportar os esforços mecânicos durante todo o voo do VS-30.

O experimento foi dividido em subsistemas para melhor acompanhamento da missão. São eles:

- **Supervisão de Bordo (OBDH – *On Board Data Handling*):** A supervisão de bordo é responsável por receber todas as informações oriundas dos sensores e executar as rotinas de monitoramento dos componentes. Assim, faz parte de suas funções coletar os dados dos equipamentos, condicioná-las e encaminhá-las ao subsistema de comunicação. Portanto, o OBDH desempenha o gerenciamento das funções do experimento e permite as conexões com as demais interfaces.

- **Comunicação (COM – *Communication*):** O subsistema de comunicação objetiva estabelecer a conexão entre o experimento e a telemetria do foguete.

- **Suprimento de Energia (PSS – *Power Supply Subsystem*):** O subsistema de suprimento de energia é responsável por prover alimentação aos componentes que constituem o experimento. É responsável também pelo condicionamento de energia aos níveis de tensão necessários aos equipamentos.

- **Estrutura (S – *Structure*):** O subsistema de estrutura é responsável por acomodar todos os equipamentos e garantir reforço estrutural para as cargas aplicadas durante as fases de manuseio, transporte, ensaios o voo.

- **Equipamento de Solo (EGSE – *Electrical Ground Support Equipment*):** Esse subsistema é responsável por fornecer serviços de operação e apoio ao experimento nas fases de ensaios e pré-voo (quando o experimento já se encontra no interior da carga-útil

do foguete). Ele fica localizado em solo sendo operado a partir da Casamata. Sua função para o projeto será acionar o experimento, verificar se os dados coletados são consistentes, e gravá-los em computador. A partir dos resultados obtidos será realizado um diagnóstico do funcionamento do experimento verificando sua funcionalidade.

Tabela 1: Lista de materiais designados para o projeto

1º Experimento	
1	Microcontrolador ARM Cortex-M4 32-bit ATSAMR21E16A
2	Kit ARM NUCLEO – F446RE
3	Conversor DC/DC CC10-2405R-E
4	Acelerômetro ADXL377BCPZ-RL7
5	Giroscópio L3GD20HTR
6	Magnetômetro HMC5883L
7	Sensor de temperatura LM35DZ/NOPB
8	Sensor de Pressão/ Altímetro MS5607-02BA03
9	Divisor de potência ADA4304 – 4ACPZ – R7
10	Current transducer HXS 20 – NP/SP30
2º Experimento	
1	Raspberry Pi 3 RPI3 – 8MP – Camera - Bundle
2	RS485 Shield V3 p/ Raspberry Pi

2.1 Descrição detalhada do hardware do 1º experimento

- **Microcontrolador ARM Cortex-M4 32bit ATSAMR21E16A**
- **Acelerômetro ADXL377BCP – RL7:** pequeno acelerômetro de 3 eixos, com pequeno consumo de corrente e com saídas de tensão de sinal demodulado. Conforme mostrado na Tabela 2, o ADXL377 mede resultado de acelerações provenientes de movimento, choques e vibrações com uma escala típica de operação da faixa de ± 200 g.

Tabela 2: Especificações do fabricante para o ADXL377

Parâmetro	Min	Typ	Max
Intervalo de medição		±200 g	
Sensibilidade do eixo transversal		±1,4 %	
Sensibilidade do X_{out} , Y_{out} , Z_{out}	5,8 mV/g	6,5 mV/g	7,2 mV/g
Desempenho de ruído X_{out} , Y_{out}		2,7 mg/VHz	
Desempenho de ruído Z_{out}		4,3 mg/VHz	
Frequência de resposta X_{out} , Y_{out}		1300 Hz	
Frequência de resposta Z_{out}		1000 Hz	
Faixa de voltagem	1,8 V	3,0 V	3,6 V
Consumo de corrente		300 μ A	
Faixa de temperatura	- 40 °C		+85 °C
Protocolo		I2C	

- **Giroscópio L3G20HTR:** sensor de frequência de baixo consumo capaz de medir a rotações angulares em três eixos. O elemento sensor é fabricado usando processo de *micromachining*, desenvolvido pela ST para produzir sensores inerciais e atuadores em bolachas de silício. Suas especificações são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Especificações do fabricante para o L3GD20HTR

Parâmetro	Min	Typ	Max
Intervalo de medição	±245 dps	±500 dps	±2000 dps
Sensibilidade	8,75 dps/dig	17,5 dps/dig	70 dps/dig
Desempenho de ruído		0,011 dps/VHz	
Frequência de resposta	11,9 Hz	189,4 Hz	757,6 Hz
Faixa de voltagem	2,2 V	3,0 V	3,6 V
Consumo de corrente		5,0 mA	
Faixa de temperatura	- 40 °C		+85 °C
Protocolo		I2C / SPI	

- **Magnetômetro HMC5883L:** é uma superfície de montagem, módulo multi-chip projetado para o sensor magnético de baixo campo com uma interface digital para aplicações tais como bússola de baixo custo e magnetometria. O HMC5883L inclui *state-of-art*, sensores da série HMC118X de alta resolução magneto-resistiva além de um ASIC contendo amplificação, Tabela 4.

Tabela 4: Especificações do fabricante para o HMC5883L

Parâmetro	Min	Typ	Max
Intervalo de medição	-8 gauss		+8 gauss
Sensibilidade	230 LSB/gauss		1370 LSB/gauss
Desempenho de ruído	2 mili-gauss		
Frequência de resposta	0,75 Hz		160 Hz
Faixa de voltagem	2,16 V	2,5 V	3,6 V
Consumo de corrente	100 μ A		
Faixa de temperatura	- 30 °C		+85 °C
Protocolo	I2C		

- Sensor de Temperatura LM35DZ/NOPB:** A série de sensores LM35 são dispositivos precisos na forma de circuito integrado para medição de temperatura com uma voltagem de saída linearmente proporcional à escala centígrada. Possuem vantagem sobre os sensores de temperatura calibrados em Kelvin, já que não requer ao usuário subtrair uma grande constante a partir da saída para obter os respectivos valores na escala centígrada. A baixa impedância e calibração precisa inerente ao usuário torna o LM35 uma interface com leitura ou controle de circuitos mais fácil. As suas especificações são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Especificações do fabricante para o LM35DZ/NOPB

Parâmetro	Min	Typ	Max
Intervalo de medição	1,5 °C		100 °C
Sensibilidade	10 mV/°C		
Desempenho de ruído	600 nV/ \sqrt Hz		860 nV/ \sqrt Hz
Frequência de resposta	20 Hz		1500 Hz
Faixa de voltagem	4,0 V		30,0 V
Consumo de corrente	60 μ A		
Faixa de temperatura	0 °C		+100 °C
Protocolo	PWM		

- Sensor de pressão MS5607 – 02BA3:** é um altímetro de alta resolução com interface de barramento SPI e I2C. Este sensor de pressão barométrica é otimizado para altímetros e variômetros com uma resolução de altitude de 20 cm. O módulo de sensor inclui um sensor de pressão de alta linearidade e um ADC de 24 bits de ultra baixa potência com coeficientes internos calibrados de fábrica. Ele fornece valores de pressão e temperatura

digital de 24 bits e diferentes modos de operação, permitindo ao usuário otimizar a velocidade de conversão e o consumo de corrente. Uma saída de temperatura de alta resolução permite a implementação de uma função de altímetro / termômetro. O protocolo de comunicação é simples, sem necessidade de programação de registros internos no dispositivo. As especificações de fabricante são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Especificações do fabricante para o MS5607 – 02BA3

Parâmetro	Min	Typ	Max
Voltagem DC de entrada	4,5 V		76 V
Voltagem de saída nominal	3,3 V	5V	12/15 V
Eficiência	71%		90%
Resistência a choque			980 m/s ²
Resistência à vibração	10 Hz		55Hz
Massa		10,0 g	
Faixa de temperatura	-40 °C		+85 °C

- **Acelerômetro ADXL001 – 70BEZ:** é ideal para aplicações industriais, médicas e militares, onde a largura de banda, o tamanho reduzido, a baixa potência e o desempenho robusto são essenciais. Ele fornece um intervalo dinâmico que se estende de ± 70 g a ± 500 g em combinação com 22 kHz de largura de banda. O canal de saída do acelerômetro passa através de um conversor diferencial para *singleend* de banda larga, que permite o acesso ao desempenho mecânico completo do sensor. Opera em suprimentos de tensão de 3,3 V a 5 V e está disponível no LCC de 8 terminais padrão da indústria. Opera entre e - 40 ° C e + 125 ° C.

A Tabela 7 na página seguinte apresenta, de uma forma resumida, as principais especificações do experimento.

(EM BRANCO)

Tabela 7: Principais características do experimento proposto.

Resumo de projeto	
Massa	2,0 kg
Dimensões	93,8 × Ø 119,0 mm
Aquisição de atitude	Microcontrolador: Dedicated ARM Cortex M4 Sensores: acelerômetro, giroscópio, magnetômetro, temperatura, pressão
Controle de temperatura	Passivo
Comunicação	RS -422
Supervisão de bordo	Microcontrolador: Dedicated ARM Cortex M4
Suprimento de energia	Baterias de NiMH 1.2V Conversores DC/DC para 5V e 3.3V

2.2 Taxas de aquisição a serem realizadas pelo experimento

Uma vez definidos os componentes eletrônicos que comporão o experimento, é preciso definir a taxa de amostragem de cada um deles, obtendo-se, assim, o volume de dados por segundo a ser transmitido pela telemetria. Neste caso, é importante estabelecer um compromisso, uma vez que uma taxa de amostragem baixa pode levar à perda de importantes informações do experimento, ao passo que uma taxa elevada pode ultrapassar a capacidade do sistema de telemetria do foguete. A Tabela 8 mostra a taxa escolhida para cada sensor.

Tabela 8: Lista de taxa de amostragem de sensores

SENSOR	TAXA DE AQUISIÇÃO UTILIZADA
Acelerômetro ADXL377BCPZ – RL7	50 Hz
Giroscópio L3GD20HTR	30 Hz
Magnetômetro HMC5883L	30 Hz
Sensor de temperatura LM35DZ	10 Hz
Sensor de Pressão	30 Hz
GPS Platform STA2058	50 Hz

Durante a missão o instrumento deverá coletar os dados de aceleração, velocidade angular, campo magnético, temperatura, pressão e altitude. Estas informações não serão salvas em memória não volátil (*flash*) do computador embarcado no experimento. Todas essas informações serão enviadas diretamente para a telemetria do foguete para serem enviadas ao solo. A Figura 1 ilustra os dados gerados em uma única aquisição do sistema. Cada leitura ou aquisição realizada pelo sistema gera 105 bytes de informações. Além das informações do sistema, cada leitura é adicionada de um *Header*, que identifica o início do pacote de dados, de um Contador, que identifica o número do pacote correspondente, e de um *Tail*, que identifica o término daquele pacote.



Figura 1: Pacote de dados gerado correspondente a uma leitura das informações do sistema.

(EM BRANCO)

A Figura 2 mostra um pacote de dados pronto para o envio ao sistema de telemetria do veículo. Este pacote contém as informações da Figura 1 codificadas e encapsuladas. A codificação empregada é a Hex-ASCII, e o encapsulamento contém bytes reservados para início e fim do pacote. A quantidade de dados do pacote é de 210 bytes. Considerando que estes serão serializados no formato 8N1, então para cada byte de informação serão gerados 10 bits. Assim cada pacote terá 2.100 bits a serem transmitidos. Como a taxa deverá ser de no máximo 9.600 bits/segundo o conjunto de dados será gerado a uma frequência máxima de 4 Hz. Portanto, deverão ser transmitidos pela telemetria 8.4 kbits de dados por segundo.



Figura 2: Pacote de dados com as informações de uma única leitura do sistema codificadas e encapsulados totalizando 210 bytes.

3. Resultados

Conforme mostrado nas Figuras 3 a 7, os protótipos do 1º e 2º experimentos, bem como o projeto da fonte já foram concluídos e os testes com *software* do 1º experimento já foram realizados e validados. Após a validação do primeiro protótipo, foi realizado o *design* da placa que será usada na versão final do modelo do 1º experimento, Figura 8. O *software* do 2º experimento também já está em fase de conclusão, Figura 9, e em breve, será testado e validado.

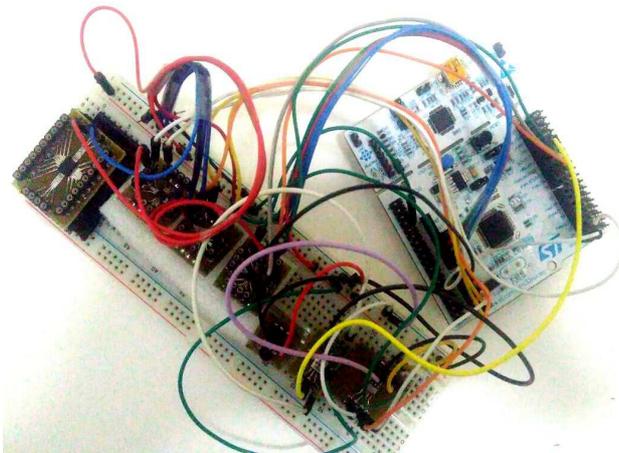


Figura 3: Protótipo do 1º Experimento.



Figura 4: Protótipo do 2º Experimento.

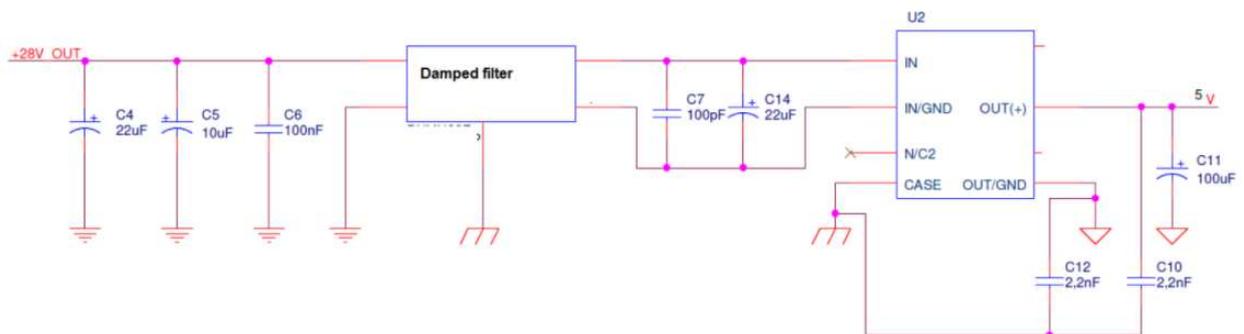


Figura 5: Projeto da fonte de alimentação dos experimentos.

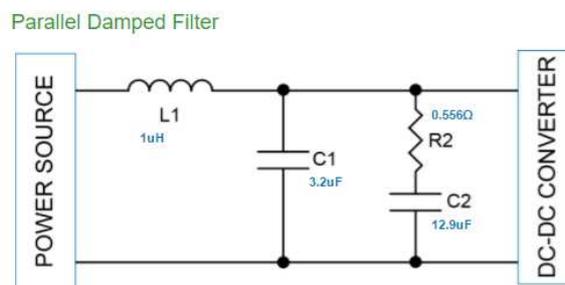


Figura 6: Projeto do filtro de linha para a fonte.

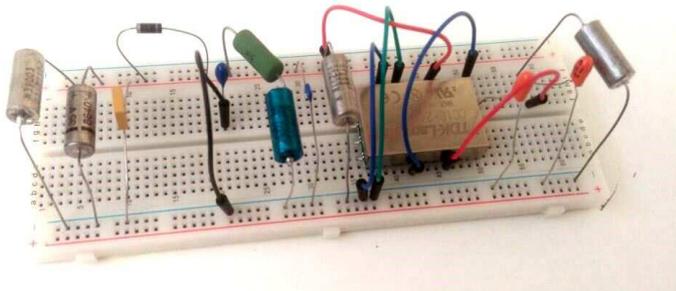


Figura 7: Protótipo da fonte.

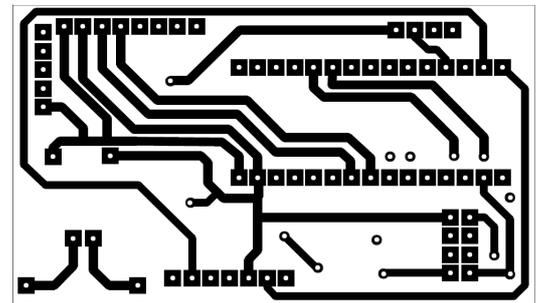


Figura 8: Design da PCB do 1º Experimento.

```
import time
import picamera
import datetime
from time import sleep
hora = datetime.datetime.strftime(datetime.datetime.now(), "%Y-%m-%d-%H-%M-%S")

with picamera.PiCamera() as camera:
    camera.hflip = True
    camera.vflip = True

    camera.video_stabilization = True
    camera.start_recording("/home/pi/video" + hora + ".h264")
    camera.wait_recording(86400)
    camera.stop_recording()
```

— Declaração das bibliotecas de códigos que serão utilizadas

— Atribui à variável "hora" a data e horário atuais

— Facilita a sintaxe, substituindo "picamera.PiCamera()" por "camera"

— Inverte a imagem da camera horizontalmente e verticalmente

— Estabiliza a camera

— Inicializa o vídeo e nomeia-o com a data e o horário da filmagem

— Espera gravando por um dia

— Encerra a gravação

Figura 9: Código parcial de aquisição de vídeo do 2º Experimento.

4. Próximas Etapas

As próximas etapas do projeto consistem em:

- Conclusão, teste e validação do *software* do *Raspberry Pi* para a aquisição de vídeo do 2º Experimento;
- *Design* da placa para a fonte de alimentação;
- *Design* da estrutura de acomodação dos experimentos;
- Integração com a telemetria e teste com os canais de comunicação de cada experimento; e
- Testes vibracionais e ambientais nos laboratórios do IAE.



5. Conclusões

O objetivo inicial do projeto de desenvolver um subsistema capaz de obter e enviar (via telemetria) dados obtidos durante o voo de foguetes suborbitais foi parcialmente cumprida, uma vez que o voo propriamente dito ainda não ocorreu, mas deverá acontecer em dezembro próximo.

O protótipo do 1º Experimento está concluído e pronto para que sua estrutura física final para voo seja montada e testada nos laboratórios do IAE. Além disso, a extensão do projeto, denominada 2º Experimento (câmara de vídeo), está em vias de ser concluído e testado, com a perspectiva de que possa ser lançada junto com o 1º Experimento.

A partir dos resultados a serem obtidos no voo do VS-30 espera-se, aperfeiçoar o experimento proposto e implementá-lo como um subsistema permanente do Foguete de Treinamento Básico (FTB), permitindo, assim, que a comunidade de estudantes de escolas e universidades disponham da possibilidade de embarcar pequenos experimentos a bordo do FTB.

Referências

- [1] Atmel SAM R21E/SAM R21G. **SMART ARM-Based Wireless Microcontroller.**
- [2] L3GD20H Datasheet. **MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope.**
- [3] ADXL377 Datasheet. **Small, Low Power, 3-Axis ±200 g Accelerometer.**
- [4] HMC5883L Datasheet. **3-Axis Digital Compass IC**
- [5] MS5607 Datasheet. **Barometric Pressure Sensor, with stainless steel cap.**
- [6] LM35 Datasheet. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors.**
- [7] ADXL001 Datasheet. **High Performance, Wide Bandwidth Accelerometer.**